

操文祥,张绍东,易帆等. 中间层顶变化的 SABER/TIMED 卫星观测. 地球物理学报, 2012, 55(8): 2489-2497, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 08. 001.

Cao W X, Zhang S D, Yi F, et al. Variation of the mesopause observed by SABER/TIMED satellite. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(8): 2489-2497, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 08. 001.

中间层顶变化的 SABER/TIMED 卫星观测

操文祥^{1,2,3}, 张绍东^{1,2,3}, 易帆^{1,2,3}, 黄春明^{1,2,3}

1 武汉大学电子信息学院, 武汉 430079

2 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉 430079

3 武汉大气遥感国家野外观测科学研究所, 武汉 430079

摘 要 本文利用 TIMED 卫星搭载的 SABER 探测仪对全球中间层顶信息进行了研究, 包括中间层顶的高度、温度及其季节和纬度变化, 并对双中间层顶现象进行了分析. 中间层顶的温度约在 160~180 K 之间变化, 高度在 85~100 km 内变化, 温度和高度都是冬季高夏季低, 有着较为一致的变化趋势. 中间层顶高纬呈现显著年变化, 而低纬和赤道呈现弱的半年变化, 南北半球的中间层顶信息有着不对称性. 高纬地区的双中间层顶现象十分显著, 中间层顶一般会从 100 km 附近迅速降低至 85 km 附近. 根据长时间范围内平均的结果显示, 北半球的双中间层顶现象在 20°N—30°N 的中纬范围开始发生, 证实了北半球双中间层顶现象不再仅限于极区和中高纬地区. 而南半球则仍是在 50°S 才显著发生双中间层顶现象. 我们统计了中高纬地区夏季所有的单个观测剖面并且与当年冬季的平均背景剖面相比较, 数据显示, 较低的夏季第二中间层顶高度绝大多数比冬季中间层顶低 12~16 km.

关键词 卫星探测, 中间层顶, 双中间层顶, 年变化, 半年变化

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 08. 001

中图分类号 P412

收稿日期 2011-09-18, 2012-05-07 收修定稿

Variation of the mesopause observed by SABER/TIMED satellite

CAO Wen-Xiang^{1,2,3}, ZHANG Shao-Dong^{1,2,3}, YI Fan^{1,2,3}, HUANG Chun-Ming^{1,2,3}

1 School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

3 State Geophysical Observatory for Atmospheric Remote Sensing, Wuhan 430079, China

Abstract We have studied the global mesopause including its seasonal and latitudinal variations of temperature and height as well as the double mesopause phenomenon using the data from SABER instrument on TIMED satellite. The results show that the temperature of the mesopause is between 160 and 180 K while the height of the mesopause is between 85 and 100 km. Both temperature and height of the mesopause are higher in winter and lower in summer. It is revealed that the temperature and height of the mesopause change nearly synchronously. An obvious annual oscillation is seen at high latitudes while semi-annual oscillation at low latitudes and the equator. There exists an asymmetry within northern and southern hemisphere mesopause information. The double mesopause is notable at high latitudes that the mesopause descends promptly from about 100 km to 85 km. The phenomenon of the double mesopause occurs widely

基金项目 国家自然科学基金项目(40825013, 40731055, 40974082, 41174126), 海洋公益性行业科研专项(201005017), 气象公益性行业科研专项(GYHY201106011), 国家重点基础研究发展计划(2012CB825605), 空间天气学国家重点实验室开放基金以及中央高校基本科研基金共同资助.

作者简介 操文祥, 男, 1984 年 9 月生, 2007 年于武汉大学电子信息学院获得学士学位, 现为该校空间物理系博士研究生, 主要从事中高层大气的卫星数据观测研究. E-mail: caowenxiang@whu.edu.cn

within the latitudes 20°N and 30°N according to the long-term average. Our results confirm that the double mesopause is not districted in polar and mid-high latitude areas. The double mesopause generally comes out from 40°S — 50°S in the southern hemisphere. We make statistic single temperature profiles in mid-high latitude in summer and compare with averaged winter background temperature profiles. The results show that most second summer lower mesopauses are lower than the winter mesopause by 12~16 km.

Keywords Satellite observation, Mesopause, Double mesopause, Annual variation, Semi-annual variation

1 引言

中高层大气的温度是描述中高层大气状态和扰动的关键物理参量,而中间层顶由于其极低的温度是中高层大气研究中关心最多和最重要的部分之一.中间层顶的分布和变化对中高层大气物理、化学以及传输等等有着重要的影响,而中间层顶参数的全球分布和变化对建立和检验全球的中高层大气模式也有着重要的意义.目前,中高层大气温度主要的地基测温手段是激光雷达,由于它的高时空分辨率,被广泛地应用在科学研究之中.多位科学家利用它探测了固定站点从对流层到低热层高度的中层大气信息^[1],在这些研究中人们关心较多的内容是中间层顶的高度和温度信息^[2-3].

过去的中间层顶观测结果表明不同季节中高层大气存在双中间层顶现象^[4].双中间层顶现象是指中间层顶高度有规律的在两个高度内变化的现象,这个现象最早由 Lubken 和 Zahn 在挪威 69°N 的站点 Andenes 由测温激光雷达发现^[5],She 和 Zahn 进一步研究了不同站点处的双中间层顶现象^[6],此后不断有科研人员对此进行研究^[7].大部分双中间层顶现象是利用激光雷达技术在高纬和极区观测研究到的,而中纬地区的双中间层顶现象报道较少^[8-9].在不同的站点,实际观测到的双中间层顶现象有一些相同季节变化,例如中间层顶高度在高纬夏季明显较低,而冬季的中间层顶都较高^[10-12].但是也有一些不同之处,例如双中间层顶发生和过渡时间段有着差异^[13].而对于产生双中间层顶现象的机制,不同的科研人员对中间层顶和双中间层顶的形成机制有着不同的见解,因此观点并不统一.多数科研人员对于不同纬度的双中间层顶现象进行了温度高度上的定量分析,给出了温度的差别.一些研究将双中间层顶现象拆分成两个不同强度的中间层顶,然后分别讨论某一个的形成机制,认为较低的中间层顶是

与 85 km 附近重力波活动密切关联,较高的中间层顶则与太阳辐射能量直接关联^[14-15].而 Berger 和 Zahn 用模式研究了双中间层顶后认为,85~100 km 范围附近的光化学作用产生的加热也会影响中间层顶的分布^[16].

无论是激光雷达还是卫星观测,在实测中都能观测到不同程度的双中间层顶现象^[17].虽然激光雷达测温有着分辨率高等优势使得它较早地被用于中间层温度的探测和大气动力学的研究中,但是单站的激光雷达探测不足以揭示中间层顶温度和高度的全球分布变化.特别是双中间层顶现象,目前仅有一些高纬和少量中纬地区站点的激光雷达观测双中间层顶结果,以及数值模拟大气温度中的双中间层顶现象^[16],而缺乏全球范围的双中间层顶结果的对比.利用全球覆盖的卫星观测数据研究双中间层顶现象则可以弥补这一不足.星载测温技术使我们能够研究全球分布的大气温度变化和双中间层顶现象^[18].本文利用了 2001 年 12 月发射的 TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics) 卫星上搭载的 SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) 观测仪所探测的全球温度分布^[19],利用 2002—2009 年共计 8 年的卫星数据研究全球中间层顶参量(温度和高度)特征和双中间层顶现象,揭示了长时间纬向平均的全球分布的(50°S — 50°N)双中间层顶变化规律.

2 数据与分析方法

2.1 数据描述

TIMED 卫星是在 2001 年 12 月发射的,旨在研究中高层大气中动力学和能量传输过程.它的轨道高度约为 625 km,轨道倾角为 74.1° ,卫星绕地球一周的时间大约为 1.6 h.它每天在近似相同的地方时飞越相同的纬度,由于每天有着约 12 min 的进

动,因此它完整覆盖地球的 24 h 地方时需要连续 60 天的运行. 搭载在 TIMED 卫星上的 SABER 探测仪是一个 10 通道宽带辐射计,用它通过临边探测 CO_2 在 $15 \mu\text{m}$ 波段的辐射信号进行反演可以获取 $15 \sim 120 \text{ km}$ 的温度数据^[20]. SABER 观测范围从主半球的 82° 到副半球的 54° ,以 60 天为周期交换一次主副半球.

本文所使用的是 SABER 从 2002 到 2009 年的 1.07 版本的数据,比起以前的 1.06 版本,它使用了一个更新的温度数据处理系统,进一步减小了误差. 一般而言 SABER 的温度精度在 100 km 以下是 2 K , 100 km 以上小于 5 K ^[17]. SABER 探测的高度覆盖范围为 $25 \sim 140 \text{ km}$. 由于我们关心的区域是中间层至低热层区域,此外考虑到 110 km 以上误差较大,我们只分析 $70 \sim 110 \text{ km}$ 之间的探测数据. SABER 在垂直方向是非均匀采样的,分辨率大约是几百米,为了方便数据的使用,我们对数据进行线性插值成 2 km 分辨率的均匀采样数据.

2.2 平均背景温度

我们采用 TIMED/SABER 的临边观测温度剖面获取大气背景温度的信息. 为了研究随纬度分布的中间层顶区域温度,我们在纬向上以 10° 为一个间隔,研究了从 50°S 到 50°N 的纬向平均的背景温度. 考虑到当 SABER 在副半球观测时,只能观测到 54° ,因而高于 54° 的约有一半的时间没有观测数据,因此我们没有研究高于纬度 50° 的中层顶温度范围. 另外根据中高层大气温度的常见的范围,去除了一些温度明显不合理的剖面. 考虑到中间层顶区域温度昼夜变化较大,大气波动剧烈,因此正确的数据处理方法才能去除大气波动暂态结构对背景温度结构带来的影响. 这里我们选取与卫星翻转周期相同的 60 天作为提取平均背景温度的范围,然后每 30 天进行一次滑动,得到每年 12 个月的逐月的背景温度剖面. 60 天数据的平均正好在同一纬度覆盖了 24 h 的地方时,可以有效去除大气潮汐成分. 这样可以得到纬向 10° 间隔、垂直方向 2 km 间隔和时间上 1 个月间隔的从 2002 到 2009 年共 8 年的全球分布大气背景温度.

图 1 所示为 2003 年 4 月 15 日到 6 月 15 日在 $45^\circ\text{N} \sim 55^\circ\text{N}$ 的 SABER 观测得到所有单个垂直温度剖面以及按上述方法提取的背景温度剖面,我们把它认为是 2003 年 5 月 50°N 的背景温度剖面. 从背景温度的剖面可以观察到:在平流层,温度随着高度增大而增大,到 $50 \sim 55 \text{ km}$ 处,温度增长至一个

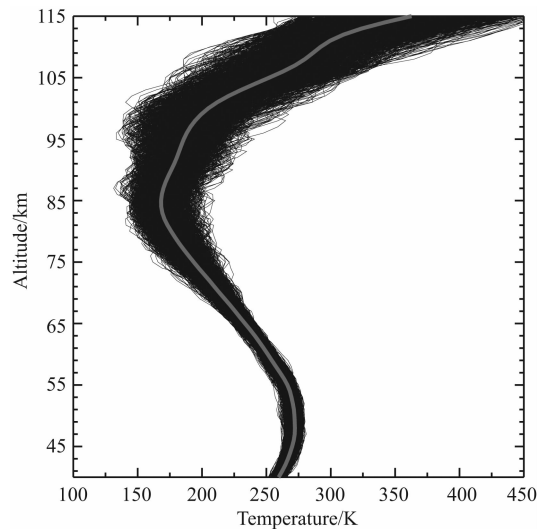


图 1 SABER 探测的 2003 年 4 月 15 日到 6 月 15 日在 50°N 的温度剖面
黑色细实线是所有的单个温度剖面,
灰线是提取的背景温度剖面.

Fig. 1 Temperature profiles observed by SABER between 15 April 2003 and 15 June 2003

Black thin curves are individual temperature profiles and the grey curve is averaged background temperature profile.

极大值. 进入中间层,温度随着高度的增大而减小,到约 85 km 处,温度达到中间层的极小值. 我们把这个温度的最低值处作为“中间层顶”(cold point mesopause). 在图 1 中,中间层顶高度约为 85 km ,平均温度约 170 K . 之后随着高度的增加大气进入低热层,温度再次开始增大.

3 中间层顶及其变化

3.1 中间层顶纬度分布

我们计算了南北半球不同纬度的 2002—2009 年内中间层顶附近随时间和高度变化的背景温度,如图 2 所示. 每月的背景温度是用第 2 节中提到的 60 天平均 30 天滑动的方法提取的,图中白线是中间层顶的高度. 背景温度在 50°N 的年变化非常明显,冬季中间层顶约在 $96 \sim 100 \text{ km}$,中间层顶温度约为 180 K ;夏季中间层顶高度下降至约 85 km ,温度也下降至约 160 K ,持续 3 或 4 个月后中间层顶上升. 即在中高纬地区不同季节中间层顶高度和温度相差都非常明显,出现较低的中间层顶现象,持续时间也较长. 而 0° 处全年的中间层顶高度稳定在 $96 \sim 100 \text{ km}$ 之间,温度约在 180 K 附近,变化很小,没有发生中间层顶高度显著降低的情况. 而 30°N 处呈现明显的过渡趋势,并且已经有较多的低中间

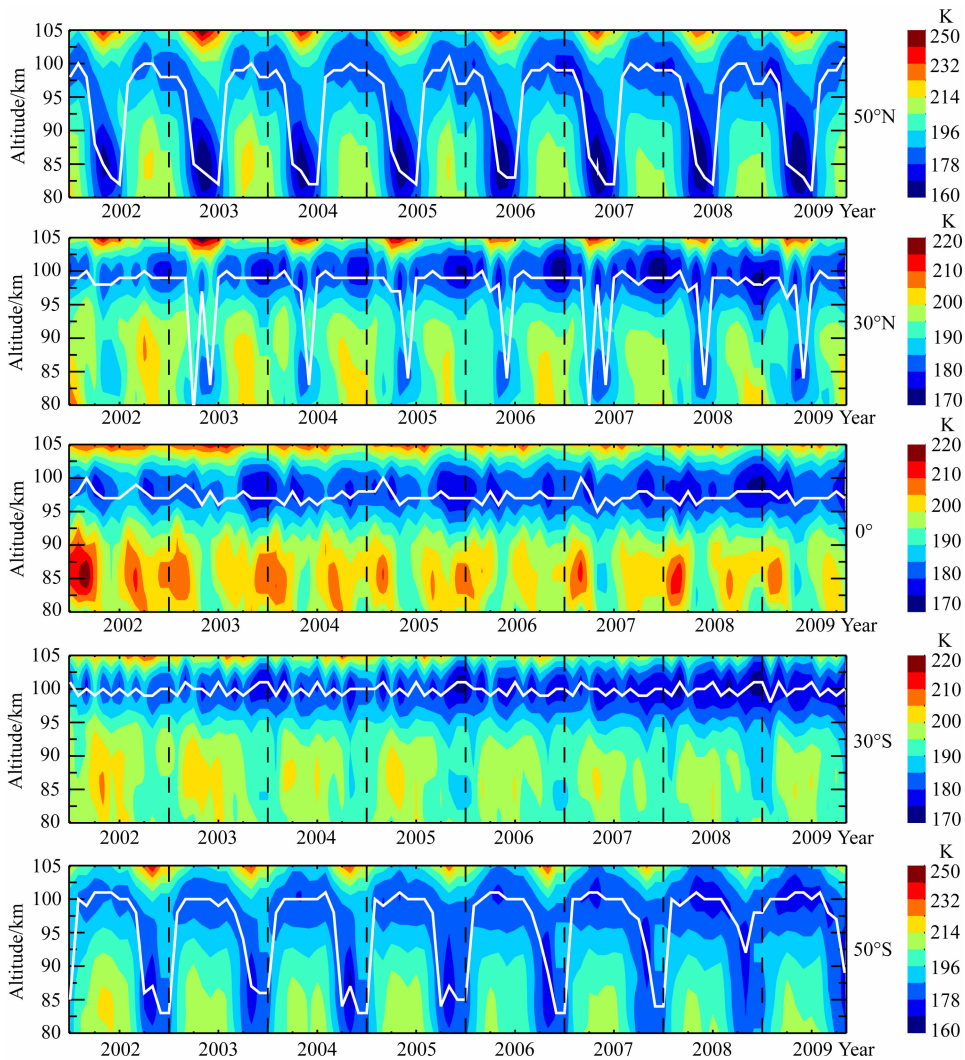


图 2 2002—2009 年间不同纬度中间层顶附近的温度和中间层顶高度的季节变化
从上到下分别为 50°N、30°N、0°、30°S 和 50°S 处的观测结果,白色实线表明中间层顶所在的高度。

Fig. 2 Seasonal variation of temperature around mesopause during 2002 and 2009 at different latitudes

The figures from the top to bottom represent the results at 50°N, 30°N, 0°, 30°S and 50°S, respectively. White solid lines mean the altitude of cold point mesopause.

层顶现象发生,如仅有 2002 年的中间层顶未明显下降,2003 和 2007 年的中间层顶在夏季发生了较大的跳变,其他的年份都是出现了一个月的较低中间层顶后,立刻回到较高的中间层顶。

南半球 30°S 与北半球 30°N 不同,没有出现较低中间层顶现象,中间层顶高度稳定在 100 km 附近,温度约 170~180 K 左右。50°S 处夏季则中间层顶显著降低,除了 2008 年中间层顶高度仅下降到约 90 km 附近,在每一年夏季中间层顶高度都下降到了 85 km 附近的高度。对比南北半球的不同结果,我们发现,北半球在 30°N 已经呈现明显的两个中间层顶的过渡的趋势了,而南半球 30°S 还完全没有这种趋势,50°处南北半球都呈现了比较明显的夏季较低的中间层顶,北半球夏季较低中间层顶持续的

时间略比南半球长,中间层顶平均温度也略低于南半球中间层顶。

3.2 双中间层顶

为了细致观察中间层顶的季节和纬度变化,我们给出不同纬度不同季节的中间层顶参数的变化,如图 3 所示,图 3a 是中间层顶高度,图 3b 是中间层顶温度。从图 3 中可以看到,在不同的纬度,中间层顶高度的变化差别非常大。赤道和中低纬(25°S—25°N)地区,中间层顶的高度几乎一直在 96~100 km,而在中高纬(25°S—50°S 以及 25°N—50°N)地区,夏季的中间层顶高度迅速下降到 84~86 km,冬季重新回到 96~100 km 附近。对于中间层顶的温度,同样是中高纬夏季较低,约为 160 K;冬季上升至 180 K 以上。中低纬地区全年中间层顶一般在 180~190 K

之间变化,偶尔个别冬季降至 170 K. 此外,中高纬的中间层顶温度和高度都有着显著的年变化,夏季低冬季高;而低纬的中间层顶温度呈现弱的半年变化,夏季最高冬季次之,春秋季节略低,并且中间层顶高度几乎不变. 图 3 中中间层顶高度变化最显著特征是在中高纬地区,中间层顶的高度在不同季节有着 10~14 km 较大的变化,这与 Lubken 和 Zahn 等人^[5,7,9]观测所得到的高纬中间层顶结果一致. 这种现象被称作“双中间层顶”(double mesopause)或者“第二中间层顶”(two-level mesopause)^[6]. 在我们的统计分析中,这种全球性的双中间层顶现象在中高纬是持续存在的. 而低纬和赤道地区偶尔出现的中间层顶高度降低是较为偶然的,不是本文关注的重点.

为了进一步分析中间层顶参数在不同季节随纬度的变化,并展示双中间层顶现象在南北半球的差异,我们给出了图 4. 从图 4 中可以看到,7 月份在 20°N 以南的区域,中间层顶高度较高,约在 100 km;在 30°N 以北的纬度中间层顶高度较低,约在 85 km 处,即出现较低的夏季第二中间层顶现象,20°N—30°N 之间属于过渡区域. 结合图 3 结果,30°N 处大部分年份可以看到双中间层顶,甚至在 2003 和 2009 年在 20°N 也看到了较低的夏季中间层顶. 图 4 中 4 月份则是约 40°N 以北才出现较低的中间层顶,1 月份和 10 月份北半球 0°—50°N 未发现较低的中间层顶. 而南半球的双中间层顶现象则是 10 月份和 1 月份(南半球夏季)在 50°S 才出现,过渡区域是 40°S—50°S. 结合图 3 对比南北半球的结果,我们发现 50°N 处夏季中间层顶温度比 50°S 平均低 10 K 以上,而 50°N 处夏季较低中间层顶(低于 90 km)的持续时间也比 50°S 多 1~2 个月. 北半球的双中间层顶现象可能起始于中纬度 20°N—30°N 附近,而南半球则起始于更高纬的 40°S 以上的区域. 这说明双中间层顶现象在南北半球有着显著的不同. 北半球夏季第二中间层顶覆盖的范围显著比南半球多 10°~20°的范围,在相同的纬度处,北半球夏季中间层顶的持续时间比南半球久,中间层顶的温度也比南半球低.

在以往的单个站点的观测结果中,大部分观测到显著双中间层顶现象的站点位于极区和高纬地区,中纬度地区有 28°N 和 35°N 站点观测到持续约两周的较低的中间层顶现象^[11,21],低纬和赤道地区还未发现较明显的双中间层顶现象. 而我们上述工作的结果已经证实,北半球普遍的双中间层顶现象

事实上是覆盖到中纬地区,不再仅限中高纬和极区了. 考虑到第二中间层顶现象主要出现在中高纬地区的夏季,我们比较了南北半球 30°~50°中冬季的平均背景温度和夏季所有的 SABER 单个观测的剖面. 如北半球,我们用 1 月 15 日前后各 30 天(共计 60 天)的平均温度表示冬季的平均背景温度,从这个平均温度剖面中得到冬季中间层顶高度,把这个冬季中间层顶高度作为一个“标准”,将这个平均的冬季中间层顶高度减去当年 7 月 15 日(夏季)前后 30 天内的单个剖面的中间层顶高度,计算冬季的平均中间层顶高度与当年夏季的单个观测剖面中间层顶高度之差值,并统计了不同高度差值出现率的分布. 南半球则用 7 月 15 日前后 30 天的平均表示冬季,次年 1 月 15 日前后 30 天表示夏季,用同样的方法计算冬季平均的中间层顶高度与当年夏季的单个剖面的中间层顶高度的差值. 图 5 是南北半球 30°~50°范围内不同的高度差值的出现率. 从图 5 中可以看到,在 50°N 处,7 月这个差值分布是以 14 km 为中心的,约有 25%的剖面的中间层顶比冬季低 14 km,90%的剖面的中间层顶比当年冬季低 8~20 km,主要差值的范围集中在 8~20 km 之间,绝大部分夏季的温度剖面的中间层顶高度是显著低于冬季的,这说明北半球高纬有显著的夏季第二中间层顶现象. 在 7 月 30°N 处,则呈现两个分布中心. 高度差值所占比例最多的是低于冬季中间层顶 12 km 的剖面,约占总剖面的 15%,总计有约 55%的剖面的中间层顶高度比当年冬季的中间层顶高度低 8~20 km;分布的另一个中心在差值为 -4~4 km 处,但是其总的出现率只有 30%左右,因此 30°N 也有较为明显的夏季第二中间层顶现象,总体上是处于两个不同高度中间层顶的过渡区域. 40°N 处的分布特点介于 50°N 和 30°N 之间.

在南半球,50°S 处的差值分布与 50°N 相似,但夏季低中间层顶的出现率略低. 如 50°S 处的差值分布中心在 12 km 处,12 km 的差值约占总计的 18%,8~20 km 的差值共占总计的 70%,略低于北半球 50°N 的 90%. 在 30°S 处,差值唯一的分布中心在 0 km 处,说明 30°S 处的夏季中间层顶高度与冬季几乎相当,低于冬季中间层顶 8 km 以上的剖面共计不到总数的 20%,因此未能产生明显的低中间层顶现象. 40°S 处是 50°S 与 30°S 之间的过渡,它虽然也呈现了两个中心的分布,但是较高的中间层顶分布显著多于较低的中间层顶. 南半球双中间层顶现象主要发生在 40°S 以南的区域,40°S—50°S 是

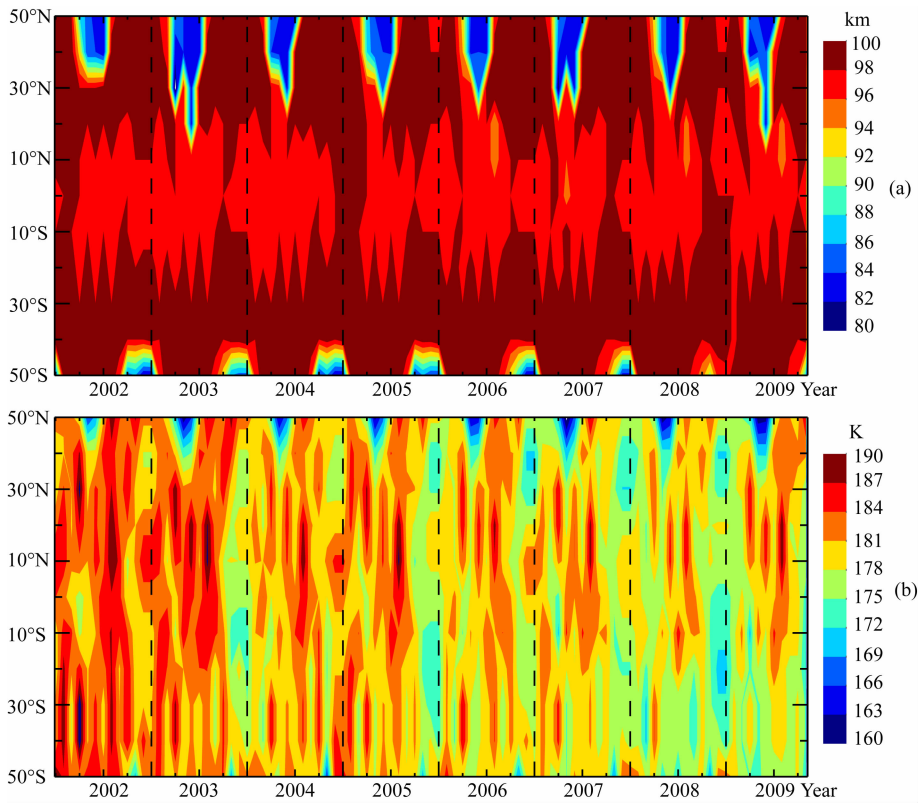


图 3 2002—2009 年间 50°S—50°N 中间层顶高度 (a) 和温度 (b) 的纬度和季节变化

Fig. 3 Latitudinal and seasonal variations of mesopause altitude (a) and temperature (b) between 50°S and 50°N from 2002 to 2009

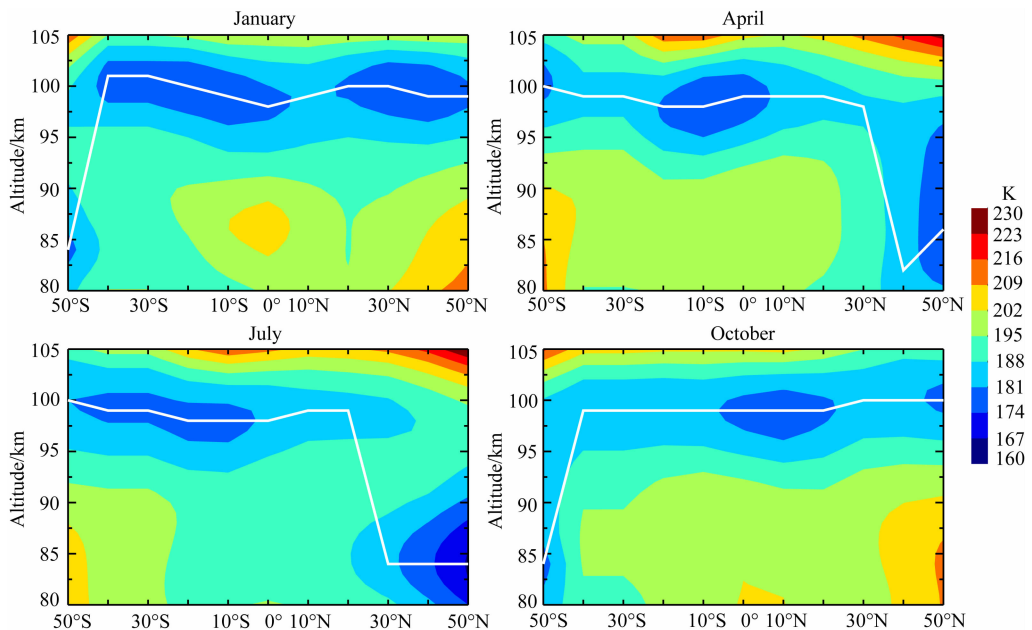


图 4 不同月份的平均背景温度随纬度和高度的变化

四幅图分别是 1、4、7 和 10 月的随纬度变化的背景温度等值线图, 白色实线表明中间层顶所在的高度。
四幅图分别表示了四个不同的季节。

Fig. 4 Latitudinal and height variability of background temperature in different months

Four images are background temperature varying with latitudes and altitudes during January, April, July and October, respectively.

The white solid lines mean the altitudes of cold point mesopause. The images represent four different seasons.

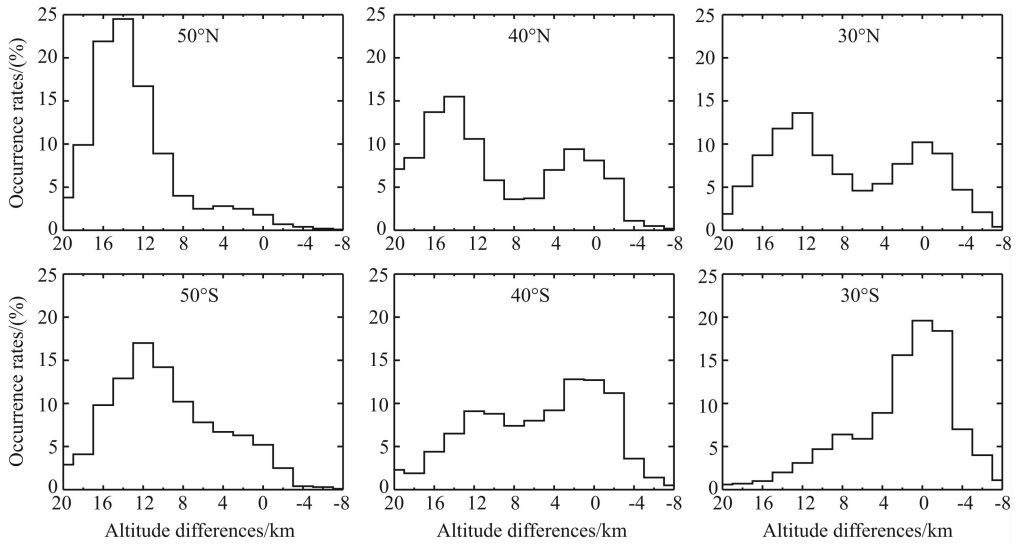


图 5 不同纬度的冬季平均中间层顶与夏季单个剖面中间层顶的差值出现率的分布

上图和下图分别是北半球和南半球的结果.

Fig. 5 Occurrence rates of altitude differences between the averaged winter mesopause and the summer mesopause derived from individual profiles

The upper and lower panels are the results in the Northern and Southern Hemispheres, respectively.

南半球的双中间层顶过渡区域. 根据以上的统计分析, 我们认为, 南半球较低的夏季第二中间层顶现象的发生率显著低于北半球, 而且第二中间层顶发生的范围也不如北半球广泛, 结合图 3 所示, 南半球约在 40°S — 50°S 之间才会产生明显的夏季第二中间层顶, 而北半球大约在 20°N — 30°N 之间就产生了.

双中间层顶的形成机制在科学界众说纷纭, 一般认为高纬中间层顶温度低于低纬的原因主要是太阳辐射的强度不同^[14-15]. 高纬地区阳光以较大的倾角斜射, 受到的辐射能量普遍小于低纬和赤道地区, 因此温度偏低. Xu 等^[12]认为, 大气内部的大气波动可能影响具体温度垂直结构的变化. Berger 和 Zahn^[16]利用全球尺度的三维非线性模式模拟了双中间层顶的结构, 结果显示, 中间层的光化学加热过程对双中间层顶的产生起着较主要的影响. 陈泽宇和吕达仁^[22]利用 SABER 的 5 年温度数据考察了 120°E 子午圈, 分析了两种控制中间层顶的机制, 分别是来自背景环流的和来自光化学作用能量分配的, 不同中间层顶的产生与这两种机制占据主导的控制作用的程度相关. 这些原因共同作用使得夏季中间层温度降低, 并且使中间层温度的垂直结构发生变化, 温度在不同高度降低的程度不同, 因此出现了新的夏季的中间层顶. 科研人员也利用不同地区站点的激光雷达通过观测对双中间层顶形成机制进行了不同的表述, 无论是在较低纬 28°N 的

Tenerife^[21], 还是在中纬度 40°N 的 Fort Collins^[10,23], 还是略高纬 54°N 的 Kuhlungsborn^[6], 还是极高纬 78°N 的 Longyearbyen^[7], 都有不同程度的双中间层顶现象发生. She 等在 Fort Collins 和 Kuhlungsborn 站点的观测结果表明, 中间层内部的大气动力学过程是形成双中间层顶的主要因素^[6,10,23]. Lubken 和 Mullemann 在 Longyearbyen 站点的观测又表明, 极区中间层的水汽饱和现象比较频繁, 容易形成极区中层云 (PMC) 和极区中层夏季回波 (PMSE) 现象, 它们对较低高度的中间层顶的形成起到一定的作用^[7]. 而 Fricke-Begemann 在 Tenerife 站点观测到的仅仅两周的较低中间层顶现象, 也与 1999 年 Berger 和 Zahn 的三维模式结论一致^[21]. 总之, 关于中间层顶的形成机制和双中间层顶的形成机制, 一些科研工作者进行了大量的研究工作并取得了一定的成果, 但是, 较为全方面地了解中间层顶结构变化还需要进行更深入更广泛的研究, 这样才能为建立中间层复杂大气模式奠定坚实的基础.

此外, 双中间层顶现象也有着比较明显的南北半球不对称性. 从图 2、图 3 中看到, 北半球中高纬区域的中间层顶温度略低于南半球, 北半球夏季较低中间层顶范围也比南半球大^[24]. 双中间层顶现象南北半球不对称性的机制主要由太阳辐射和地球自转特性所致. 由于地球本身并不是一个规则的球体, 它的离心率及其自转的轨道倾角导致地球在 1 月左右 (南半球夏季) 受到了比 7 月更多的辐射, 因此南

半球夏季的中间层顶温度普遍高于北半球. 而大气波动可能是影响双中间层顶现象半球不对称性的另一个原因. Xu 等人^[12]认为,重力波是导致这个半球不对称性的一个原因,因为地球表面北半球陆地比南半球多,而地形因素是激发重力波的一个重要因素,陆地比海洋更容易激发重力波活动^[25]. 北半球较多的重力波活动使得大气的绝热膨胀降温效果比南半球更加显著,因此北半球夏季较低的中间层顶现象发生的范围普遍比南半球更加广泛.

4 结 论

本文利用 TIMED 卫星搭载的 SABER 观测仪所探测的随高度分布的温度数据,进行了背景温度的提取工作,从而得到 9 年随时间和纬度变化的中间层顶的高度和温度信息,定量讨论了从 2002—2009 年间 50°S—50°N 之间中间层顶的变化以及双中间层顶现象. 由于采用的是 60 天范围内的平均,可以有效去除背景温度场中可能存在的大气潮汐分量. 主要结论如下:

(1)赤道和低纬地区中间层顶高度全年稳定在 98~100 km,中间层顶温度在 180~190 K 之间,呈现弱的半年变化. 高纬地区中间层顶高度冬季在 100 km,温度约 180 K 以上,而夏季中间层顶约在 85 km,温度只有 160 K,呈现明显的年变化.

(2)高纬地区有着持续显著的双中间层顶现象,夏季中间层顶一般比冬季中间层顶低 12~16 km.

(3)北半球中纬度 20°N—30°N 地区也会有明显的双中间层顶现象,我们认为这是高纬显著的双中间层顶区域的过渡区域,是北半球中纬度所具备的广泛特征;而南半球则在更高的 40°S 以南才会有明显的双中间层顶现象.

参考文献(References)

- [1] Beig G, Keckhut P, Lowe R P, et al. Review of mesosphere temperature trends. *Rev. Geophys.*, 2003, 41(4): 1-41.
- [2] Yu C M, Yi F. Atmospheric temperature profiling by joint Raman, Rayleigh and Fe Boltzmann lidar measurements. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2008, 70(10): 1281-1288.
- [3] Friedman J S, Chu X Z. Nocturnal temperature structure in the mesopause region over the Arecibo Observatory (18.35°N, 66.75°W): Seasonal variations. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112: D14107, doi: 10.1029/2006JD008220.
- [4] She C Y, Yu J R, Chen H. Observed thermal structure of a midlatitude mesopause. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20(7): 567-570.
- [5] Lübken F J, Zahn U V. Thermal structure of the mesopause region at polar latitudes. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(D11): 20841-20857.
- [6] She C Y, Zahn U V. Concept of a two-level mesopause: Support through new lidar observations. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(D5): 5855-5863.
- [7] Lübken F J, Mullemann A. First in situ temperature measurements in the summer mesosphere at very high latitudes (78°N). *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(D8): 8448, doi: 10.1029/2002JD002414.
- [8] Venkat Rarnam M, Patra A K, Krishina Murthy B V. Tropical mesopause: Is it always close to 100 km? *J. Geophys. Res.*, 2010, 115: D06106, doi: 10.1029/2009JD012531.
- [9] Lübken F J. Thermal structure of the Arctic summer mesosphere. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(D8): 9135-9149.
- [10] She C Y, Chen S S, Hu Z L, et al. Eight year climatology of nocturnal temperature and sodium density in the mesopause region (80 to 105 km) over Fort Collins, CO (41°N, 105°W). *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27(20): 3289-3292.
- [11] Chu X, Gardner C S, Franke S J. Nocturnal thermal structure of the mesosphere and lower thermosphere region at Maui, Hawaii (20.7°N), and Starfire Optical Range, New Mexico (35°N). *J. Geophys. Res.*, 2005, 110: D09S03, doi: 10.1029/2004JD004891.
- [12] Xu J Y, Liu H L, Yuan W, et al. Mesopause structure from Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics, and Dynamics (TIMED)/Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry (SABER) observations. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112: D09102, doi: 10.1029/2006JD007711.
- [13] States R J, Gardner C S. Thermal structure of the mesopause region (80~105 km) at 40N latitude, part I: Seasonal variations. *J. Atmos. Sci.*, 2000, 57(1): 66-77.
- [14] Holton J R. The influence of gravity wave on the general circulation of the middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1983, 40(10): 2497-2507.
- [15] Houghton J T. The stratosphere and mesosphere. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 1978, 104(439): 1-29.
- [16] Berger U, Zahn U V. The two-level structure of the mesopause: A model study. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(D18): 22083-22093.
- [17] Xu J Y, She C Y, Yuan W, et al. Comparison between the temperature measurements by TIMED/SABER and lidar in the midlatitude. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: A10S09, doi: 10.1029/2005JA011439.
- [18] Thulasiraman S, Nee J B. Further evidence of a two-level mesopause and its variations from UARS high-resolution Doppler imager temperature data. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107(D18): 4355, doi: 10.1029/2000JD000118.
- [19] Mlyneczek M G. Energetics of the mesosphere and lower thermosphere and the SABER experiment. *Adv. Space*

- Res.*, 1997, 20(6): 1177-1183.
- [20] Mertens C J, Mlynczak M G, Lopez-Puertas M, et al. Retrieval of mesospheric and lower thermospheric kinetic temperature from measurements of CO₂ 15 μm Earth limb emission under non-LTE conditions. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28(7): 1391-1394.
- [21] Fricke-Begemann C, Hoffner J, Zahn U V. The potassium density and temperature structure in the mesopause region (80 ~ 105 km) at a low latitude (28°N). *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(22): 2067, doi: 10.1029/2002GL015578.
- [22] 陈泽宇, 吕达仁. 卫星遥感东经 120°子午圈 MLT 典型温度结构: 中间层顶统计分析. *地球物理学报*, 2008, 51(4): 982-990.
- Chen Z Y, Lü D R. Satellite remote sensing of the characteristics of MLT mean temperatures in the 120°E meridian: The mesopause. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(4): 982-990.
- [23] Chen S S, Hu Z L, White M A, et al. Lidar observations of seasonal variation of diurnal mean temperature in mesopause region over Fort Collins, Colorado (41°N, 105°W). *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(D10): 12371-12379.
- [24] Kawahara T D, She C Y, Tsutsumi M, et al. Wintertime mesopause temperatures observed by lidar measurements over Syowa station (69°S, 39°E), Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(15): 1709, doi: 10.1029/2002GL015244.
- [25] Tsuda T, Nishida M, Rocken C, et al. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET). *J. Geophys. Res.*, 1999, 105(D6): 7257-7273.

(本文编辑 何 燕)